

地球環境問題における エネルギー需給モデル・シミュレーション

岡本 眞一* 林 正幸**

地球温暖化の主要原因物質である二酸化炭素の排出量を化石燃料の需給動向から考察する。ここでは、世界を7地域に分割して、石炭、石油、天然ガスの生産量と消費量のデータよりエネルギー需給モデルを作成した。このモデルを用いて、西暦2000年までのエネルギー需給と二酸化炭素の排出量を予測した。この結果、人口、GDP、エネルギー利用効率、エネルギー価格の上昇率が現状のまま推移した場合、西暦2000年での二酸化炭素排出量は7400Mt-C (メガトン炭素換算) と予測された。

1. はじめに

人口増加、経済発展、技術の進歩などにより将来のエネルギーの需要と供給がどのように変化するかを検討することはエネルギー経済の面から重要な課題である。しかし、その多くは石油などのエネルギーの需給量と価格、経済成長の関係などの解析^{1),2)}や原子力発電、太陽エネルギーなども含めたエネルギー構造変化の予測^{3),4)}を目的とするものであった。しかし、1980年代に入ってから、CO₂濃度の増加による地球温暖化が重要なテーマとして取り上げられるようになると、地球環境とエネルギー問題の関連として、将来のCO₂排出量予測にエネルギー需給モデルが利用されるようになった^{5),6)}。しかし、最近では将来のエネルギー構造を予測する場合にも、CO₂排出量の抑制などの環境政策が重要なファクターとして考慮されている^{3),5)}。

わが国においても、エネルギー需給とCO₂排

出量の将来動向についてのシミュレーションを扱った報告がいくつかある^{7)~9)}。しかし、これらの大部分はEdmonds-Reilly³⁾のモデルを利用して、モデル中の係数やシナリオを変えて計算したものである。Edmonds-Reillyモデルは各国で利用されており、現在最も信頼されているモデルの1つである。しかし、このモデルにおいても、他のモデルと同様に多くの仮定に基づくモデル式や係数を利用している。既存データの「あてはめ」においては、これらの未知係数が多くなるほど、良い結果が得られるが、将来予測においても同様の精度が得られる保証はない。例えば、化石燃料の需給予測では可採埋蔵量が重要なファクターであり、可採埋蔵量を含むロジスティック型のモデルとして生産量を表わす方法もある。しかし、可採埋蔵量は資源探査技術と採掘技術の関数として毎年変化し、技術開発の進捗はエネルギー価格や各国の政策によって変化する。単純なモデルで表わすことはでき

* 東京情報大学助教授 ** 芝浦工業大学教授

ない。このように考えれば、かなり大胆な仮説の下に簡略化されたモデルによる予測値と多くのパラメータを含むより詳細なモデルによる値との間にどの程度の相違があるかを見ることは興味深い。このようなモデルについての総説としては、Keepin¹⁰⁾ などがあり、最近までの重要な研究成果の概要が紹介されている。

2. エネルギー需給・CO₂排出量予測モデル

CO₂排出量の予測においては、石炭などの化石燃料の消費量の将来動向が重要である。将来のエネルギー構造を予測するには、太陽エネルギー等の代替エネルギーに関する技術開発の予測や原子力発電についての政策判断なども不可欠な要素であるが、予測期間を今後10年間程度に限定すれば、エネルギー構造を大きく変えるような新技術の急速な進展はないと考えてもよいであろう。したがって、今回は石炭、石油、天然ガスの3種類の化石燃料の需給動向とそれら

によるCO₂排出量の予測を行う。このモデルの基本構成を図1に、モデル作成の手順を表1に示す。すなわち地域別のエネルギーの需給量と供給量を予測するモデルをそれぞれ作成し、需要量と供給量の小さい方の量を消費量とする単純なモデルを考える。過去の石油価格の変動を見ると、エネルギーの需給バランスや利用技術の進歩よりも、国際紛争や産油国間の価格調整の強弱の影響を強く受け、石油価格の変動がエネルギー利用技術や代替エネルギー開発の進捗を決定している。したがって、今回のモデルはエネルギー価格を需要と供給の均衡点とする一般的な方法は採用せず、今後10年間程度では一定の割合で価格が上昇するという単純なモデルを考えることにする。

2.1 地域分割

二酸化炭素排出量の予測を行うために、世界

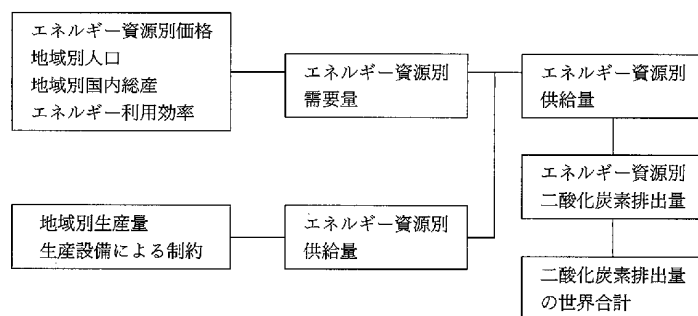


図1 モデルの構成

表1 モデル作成の手順

- | |
|---|
| <p>(手順1)・・・世界全体をエネルギー経済面および地理的条件から七つの地域（北米、中南米、アジア・オセANIA、西アジア、アフリカ、西欧、旧共産圏）に分割する。</p> <p>(手順2)・・・文献により各地域ごとの生産量、消費量、GDP、エネルギー資源ごとに価格、人口のデータを集める。</p> <p>(手順3)・・・エネルギー資源需要量の予測モデルを作成する。</p> <p>(手順4)・・・エネルギー資源供給量の予測モデルを作成する。</p> <p>(手順5)・・・供給量、需要量の予測値から、エネルギー資源消費量を求め、エネルギー原単位を用いて二酸化炭素排出量の予測を行うモデルを作成する。</p> <p>(手順6)・・・将来予測のためのシナリオを価格、GDP、人口、エネルギー効率のそれぞれについていくつか作成する。</p> <p>(手順7)・・・(手順3)、(手順4)、(手順5)において作成したモデルを使って、(手順6)で作成したシナリオごとに二酸化炭素排出量を求める。</p> |
|---|

全体をエネルギー経済の面および地理的条件により、いくつかの地域に分割して考える。

まず経済のしくみの違いから社会主義諸国と資本主義諸国とに分け、社会主義諸国を共産圏という一つの地域にまとめる。共産圏は旧ソ連、東欧(ブルガリア、チェコスロバキア、旧ドイツ民主共和国、ハンガリー、ポーランド、ルーマニアなど)、中国、北朝鮮、モンゴル、ベトナム、およびキューバから成る。現在ではこれら諸国の多くは経済システムが変わっているが、回帰分析に用いる過去数年のデータを考えて、このように分類した。

次に、エネルギー資源の側面から中東地域は他の地域とは区別して考える必要があるので、西アジアという一つの地域にまとめる。西アジアは、バーレーン、キプロス、民主イエメン、イラク、イスラエル、ヨルダン、イラン、クウェート、レバノン、オマーン、カタール、サウジアラビア、シリアアラブ共和国、トルコ、アラブ首長国連邦およびイエメンから成る。

他の地域については、地理的条件から北米(アメリカ合衆国、カナダ)、中南米(キューバを除く中央アメリカ、南アメリカおよびカリブ海諸国)、アジア・オセアニア(中国、北朝鮮、モンゴルおよびベトナムを除く)、アフリカ、西欧の五つに分ける。

以上のように世界を全部で七つの地域に分割する。これにより、以降のエネルギー資源供給量予測、エネルギー資源需要量予測、エネルギー資源消費量予測および二酸化炭素排出量予測についての解析は、地域ごとに行うことにする。

2.2 使用データ

ここで石炭とは、無灰無水基準で総熱量5700 cal/g以上のすべての品位の無煙炭および瀝青炭から成り、新しく生産された微粉、粉、中塊および塊のものを含む。

石油は、油井から得られ、主として非芳香族炭化水素(脂肪族、脂環族その他)から成る液体生産物であり、静注、脱水または安定(輸送の便宜

のためにある程度の分解炭化水素ガス除去)のための措置以外のいかなる加工も施されていないものである。

天然ガスは、地下自然源から得られ、炭化水素から成る可燃性ガスである。

実際に使用する石炭、石油、天然ガスの生産量、消費量のデータは、国際連合エネルギー統計年鑑(1980、1985年度版)¹¹⁾、人口、エネルギー価格のデータは、世界国勢図会(1985年度版)¹²⁾、国内総生産のデータは、世界統計年鑑(1985/86年度版)¹³⁾から引用した。なお、天然ガスの価格はLNGの価格で代用し、文献²⁾より引用した。人口データのうち調査のない年度については、前後の調査年度の値より直線回帰式により推定された値を用いた。

2.3 エネルギー資源需要量予測モデル

CO₂排出量の将来推定を行うには、エネルギー消費量の把握が重要である。また、将来のエネルギー需給動向を予測するためには、人口、経済成長率などの社会基礎的なパラメータやエネルギー生産のためのコスト、燃料価格、あるいはライフスタイルなどのエネルギー需要に関連する要因について検討する必要がある。

需要量の予測方法を考えるとき、まず過去の需要量について検討する必要がある。しかし、過去の需要量を正確に把握することは非常に困難であり、多くの場合、需要量および供給量から決定されるエネルギー消費量としてのデータ以外を得ることは難しい。このため、過去の需要量の代わりに過去の消費量のデータを用いて需要量の予測を行う。

需要量の変化に影響を与える要因としては、エネルギー価格、人口、国民総生産(国内総生産)およびエネルギー利用効率などが挙げられる。それぞれの要因と需要量の関係について考えてみる。

ここではエネルギーとして石炭、石油、天然ガスの3種のみを考えているが、これらの価格や需要は互いに影響を及ぼしあっていると考

ければならない。ある資源の価格が上昇すると、消費者はその資源を節約したり、ほかの資源を使用するようになる。その結果、ほかの資源の需要量が増加し、同時に価格の上昇も生じる。このことから、石炭、石油、天然ガスの価格は、お互いに影響を及ぼし合いながら変動していると考えられる。したがって、3種のエネルギー価格と需要量の間の関係を考慮してモデルを作成しなければならない。

次に人口について考える。ある地域の生活水準が現在の状態のまま変化しないと仮定すると、一人あたりのエネルギー需要量の変化は起きない。しかし、その地域の人口が増加すると、それに比例してエネルギー需要量も増加する。したがって、人口と需要量の間の比例関係を考慮してモデルを作成することが考えられる。

次に国内総生産について考える。産業の振興やモータリゼーションなど経済規模が大きくなるにつれ、エネルギー需要は増大する。その経済規模をとらえる尺度の一つとされる国内総生産の値は、エネルギー需要が増加すると、それに比例して大きくなると考えられる。したがって、国内総生産と需要の間の比例関係を考慮してモデルを作成しなければならない。

最後にエネルギー利用効率について考える。今後、環境問題が大きく取り上げられると、省エネルギーの動きがさらに加速され、その結果としてより効率の良い設備の導入や利用技術の進歩が当然予測される。エネルギー利用効率が上昇すると、エネルギー需要はその逆数に比例して減少すると考えられる。したがって、エネルギー利用効率と需要の間の反比例の関係を考慮してモデルを作成しなければならない。以上の仮説の下で作成したモデルを式1)、2)に示す。

$$CO_{ijk} = (A_{ij} + B_{ij} \times \frac{P_{1,k-1}}{P_{1,k-2}} + C_{ij} \times \frac{P_{2,k-1}}{P_{2,k-2}} + D_{ij} \times \frac{P_{3,k-1}}{P_{3,k-2}}) \times \frac{POP_{ijk-1}}{POP_{ijk-2}} \times \frac{GDP_{ijk-1}}{GDP_{ijk-2}} \times \frac{EF_{ijk-1}}{EF_{ijk-2}} \quad (1)$$

$$DEM_{ijk} = DEM_{ijk-1} \times CO_{ijk} \quad (2)$$

CO	: 消費量の前年比上昇率
P	: エネルギー価格
POP	: 人口
GDP	: 国内総生産
EF	: エネルギー利用効率
DEM	: 需要量
A、B、C、D	: 係数
(i: 資源、j: 地域、k: 年)	

このモデルでは、価格、人口、国内総生産およびエネルギー利用効率の変化率から消費量の変化率を求めて、それを前年の需要量に掛けることで需要量を予測する。そして、この需要量の予測値は一年ごとに求められることになる。

なお定数A、B、C、Dは、(消費量の上昇率/人口の上昇率/GDPの上昇率×エネルギー利用効率の上昇率)を目的変数として、価格P₁、P₂、P₃の対前年比率を説明変数とする重回帰分析により求める。

2.4 エネルギー資源供給量予測モデル

エネルギー供給量はその時の価格、生産設備、長期的には埋蔵量などの関数と考えることができるが、これらの統計量の多くは供給量を定量的に記述するための基礎データとしては不十分であることが多い。また、このため供給量の予測に関して、埋蔵量などによる資源制約および生産設備の限界による設備制約のみを受けるものと仮定し、これらの制約を受けない限り、供給量は過去の生産量のデータから得られる年平均成長率に従って増加するものとも考えることもできる。

しかし埋蔵量については、どの程度の貧乏まで含めるのか、現在の生産技術で採取可能なものかどうか(例えば南極大陸や北極海の氷域下)という問題がある。また、最近までに発表されたいくつかの報告を見てもその上下の幅は大きく、また年度とともに大きくなっており、究極の可採埋蔵量やバックストップ技術の発展を考える上で大きな障害となっている。

したがって、ここでの供給量の予測モデルは、生産設備による制約のみを考慮して作成することにする。作成したモデルを式(3)～(6)に示す。

$$SU_{ijk} = SUP_{ijk-1} \times PR_{ij} \quad (3)$$

$$LSU_{ijk} = SUP_{ijk-1} \times M_{ij} \quad (4)$$

ここで SU_{ijk} と LSU_{ijk} の大小比較を行う。

$$SU_{ijk} > LSU_{ijk} \text{ ならば } SUP_{ijk} = LSU_{ijk} \quad (5)$$

$$SU_{ijk} \leq LSU_{ijk} \text{ ならば } SUP_{ijk} = SU_{ijk} \quad (6)$$

SU : 設備制約を受けない供給量暫定値

PR : 生産量の前年比上昇率

M : 生産設備の前年比上昇率

LSU : 生産設備による供給量の上限

SUP : 供給量

供給量のモデルも需要量のモデルと同じように、生産量の上昇率を前年の供給量に掛けることにより供給量を予測する。そしてこの予測供給量が生産設備による制約による上限値を超えているかどうか判断して、制約を受けなければ式3)で求めた供給量がそのまま供給量の予測値となり、もし制約を受ければ生産設備による上限値が供給量の予測値となる。

2.5 エネルギー資源消費量モデル

エネルギー資源供給量予測モデルとエネルギー資源需要量予測モデルを使用して、エネルギー資源消費量を求める方法について考える。

ここで作成したモデルにおいて、需要量とは輸入量、輸出量および在庫変化を含めて消費者の求めるエネルギー資源量のことであり、供給量は生産量とその設備制約だけにより求められるものである。したがって、需要量が供給量による制約を受けなければ需要量を消費量と考えることにする。

また今後、世界全体でエネルギー資源の在庫量に変化が起きないと仮定して予測を行う。この仮定のもとでは、輸入量の世界合計と輸出量の世界合計とは等しくなるため、消費量を求め

るときに輸入量、輸出量について考えなくて良い。

したがって、ここでは以下の条件判断に基づいて、式(7)～(9)によりエネルギー資源消費量を求める。

$$ESUP_{i,k} = \sum_j SUP_{ijk} \quad (7)$$

$$EDEM_{i,k} = \sum_j DEM_{ijk} \quad (8)$$

$$ESUP_{i,k} > EDEM_{i,k} \longrightarrow ECON_{i,k} = EDEN_{i,k} \quad (9)$$

$$ESUP_{i,k} \leq EDEM_{i,k} \longrightarrow ECON_{i,k} = ESUP_{i,k}$$

$ESUP_{i,k}$: 供給量の世界合計

$EDEN_{i,k}$: 需要量の世界合計

$ECON_{i,k}$: 消費量の世界合計

SUP_{ijk} : 地域 j での供給量

DEM_{ijk} : 地域 j での需要量

2.6 二酸化炭素排出量予測モデル

二酸化炭素排出量は、エネルギー資源の種類ごとに単位量燃焼当たりの二酸化炭素排出原単位にエネルギー資源の消費総量を掛け合わせて加えた値である。

$$Y = \sum_i EiXi \quad (10)$$

Y : 二酸化炭素排出量

Ei : エネルギー種 i の二酸化炭素排出原単位

Xi : エネルギー種 i の消費量

ここで Xi の単位としては、一般にエネルギー種固有の単位(体積、質量)、熱量単位、石油換算量の3種がよく用いられる。なお石油換算量については体積、質量の両方が用いられている。こうした単位の混在は排出量算定の過程を煩雑化させている。表2に二酸化炭素排出原単位 Ei を示す。なお Ei および Y に表される二酸化炭素量は、炭素量換算として表現されることが多く、ここでもそれに従うことにする。

本来 Ei は、資源の産地による性状の違いや、精製による二次製品への転換の過程での性状の

表2 エネルギー資源原単位表 (単位: Mt-C/各単位)

	熱量 /EJ	熱量 /10 ¹² kcal	石油等価 /100万 kl	石油等価 /100万 t	燃料 /100万 t
固体燃料 (石炭等)	23.8	0.0996	0.921	1.067	0.697
液体燃料 (石油等)	19.2	0.0803	0.743	0.861	0.861
気体燃料 (天然ガス等)	13.7	0.0573	0.530	0.614	0.745

1 TCE (メートルトン石炭換算)=7000×10⁹kcal1 TOE (メートルトン石油換算)=10180×10⁹kcal1 TJ (テラジュール)=10¹²J=0.2388×10¹²kcal

変化を考慮して、エネルギー種 i を可能な限り細分化して定義することが望ましいが、一般によく用いられる Edmonds⁹⁾ の値を用いたため、エネルギー種は固体燃料 (石炭)、液体燃料 (石油)、気体燃料 (天然ガス) の3種としている。

なお、このデータでは、石炭、石油について千メートルトン、天然ガスについてはテラジュールで示されている。原単位表を用いるに当たっては、表2に示す換算値を用いて各単位を熱量に換算したのち、表2の熱量基準の値を使用する。

3. モデルの詳細

前節で説明した手順に従い、CO₂排出量予測モデルを作成した。まず需要量予測モデルに含まれる係数A、B、C、Dを求めるために重回帰分析を行った。この重回帰分析では式1)を変形して

$$y_k = \text{CO}_{2k} / \left\{ \frac{\text{POP}_{\cdot, jk-1}}{\text{POP}_{\cdot, jk-2}} \cdot \frac{\text{GDP}_{\cdot, jk-1}}{\text{GDP}_{\cdot, jk-2}} / \frac{\text{EF}_{\cdot, jk-1}}{\text{EF}_{\cdot, jk-2}} \right\}$$

$$x_{1k} = \frac{P_{1, k-1}}{P_{1, k-2}}$$

$$y_k = \beta_0 + \beta_1 x_{1k} + \beta_2 x_{2k} + \beta_3 x_{3k} \quad (1)$$

そして、偏回帰係数 $\beta_0, \beta_1 \sim \beta_3$ を推定し、この値を係数A、B、C、Dとした。ここで、代表的な数例について y の実測値と y の推定値 \hat{y} の関係を図2に示す。また、このときの重相関係数と

誤差分散の値を表3に示す。この重回帰式では、説明変数の数に比べてデータ数が少なく、自由度の大きさは十分とはいえないが、この結果について考察を加えて見よう。

定数A、B、C、Dはそれぞれ定数項、石炭価格の係数、石油価格の係数、天然ガス価格の係数である。この係数の符号は、エネルギー資源価格の上昇に伴う需要量の増減を示している。このモデルでは需要量の中に輸入量、輸出量を含んでいるため、輸入量の大きい地域と輸出量の大きい地域とでは、価格の上昇による影響の受け方が異なる。したがって、各資源ごとの分析を行う際にエネルギー資源価格が上昇するのに伴い、そのエネルギー資源の需要量が必ずしも減少するとはいえない。また、石炭の需要の変化を見ると1979年に実測値と予測値の距離が最も大きい。これは、1979年のオイルショックによる石油価格の上昇が与える影響によるものと考えられる。それに比べて天然ガスは石炭ほどの差が現れていない。その理由としては、当時のエネルギー消費に占める天然ガスの割合が石炭のそれに比べてかなり小さく、主として石炭に石油価格高騰の影響が及んだものと推測される。

これらのことは、重回帰分析により係数A、B、C、Dを求める時に精度を下げる原因となっている。しかし、表3の重相関係数の値が多く、この地域において0.7以上となっており、この需要量予測モデルもある程度は有効なモデルであると考えことにする。

次に、供給量予測モデルと消費量予測モデルを作成した後、消費量予測モデルの信頼性を確

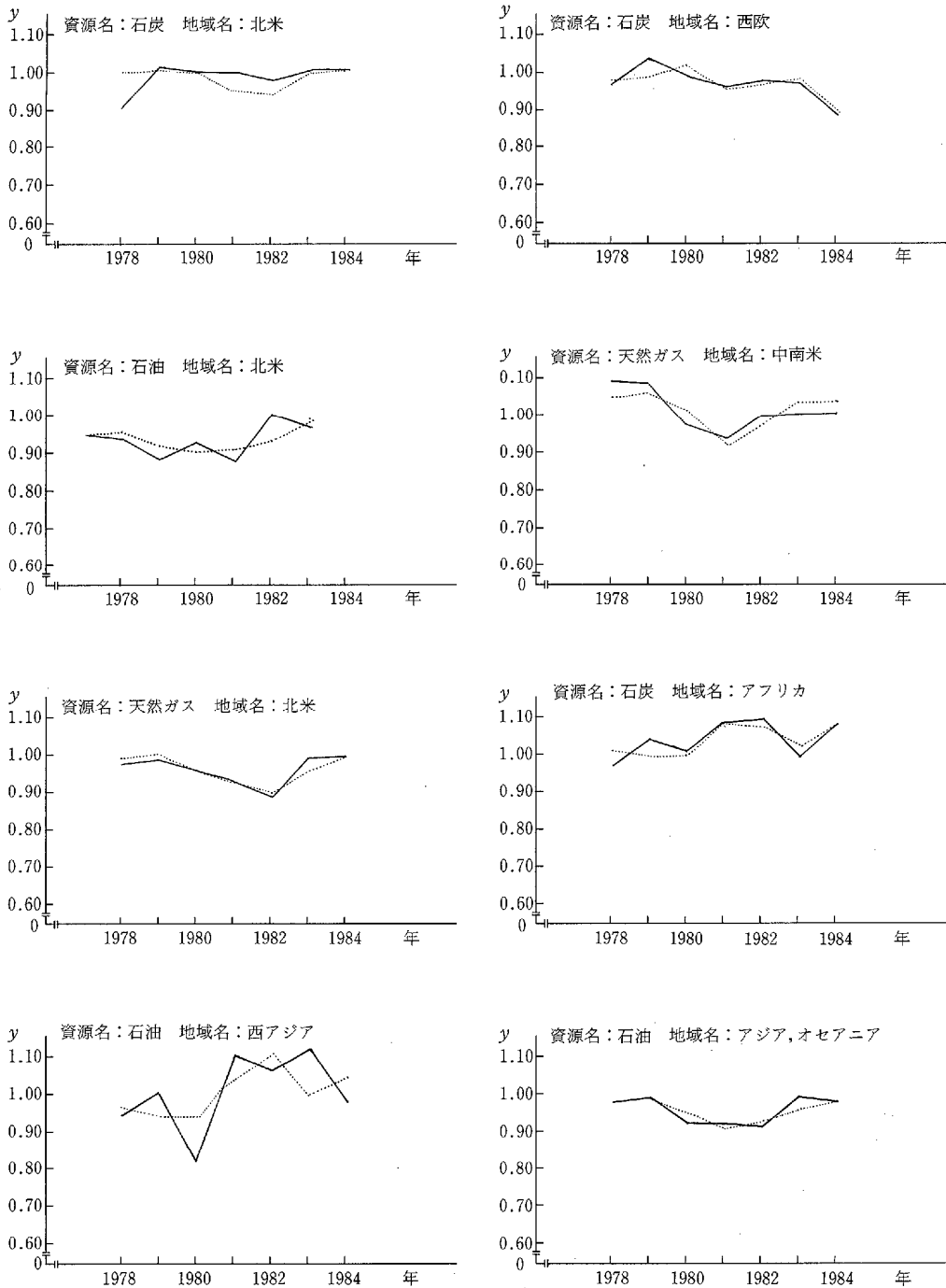


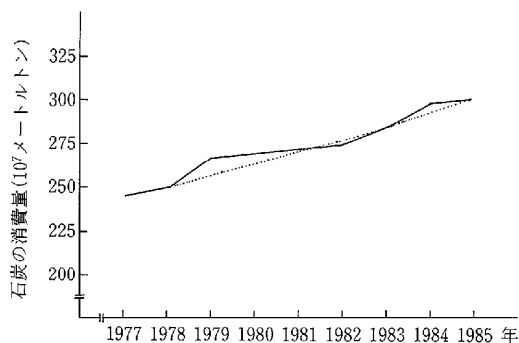
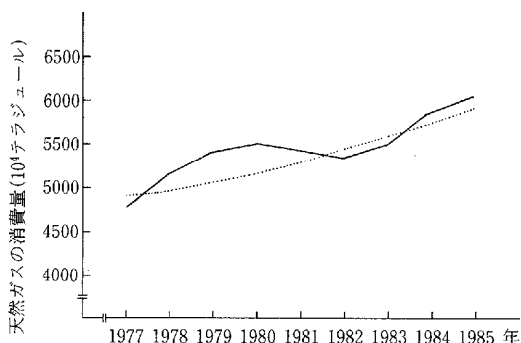
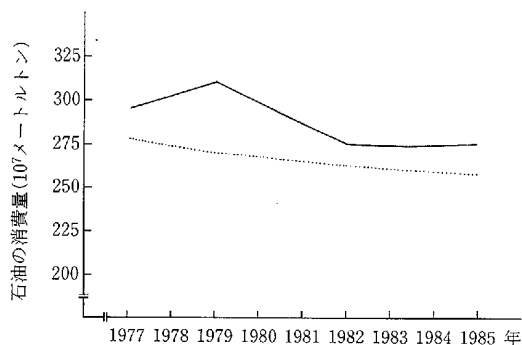
図2 $y = \frac{CO_k}{\frac{POP_{k-1} \cdot GDP_{k-1}}{EF_{k-1}}}$ についての実測値(実線)と計算値(点線)の比較例

表3 需要量予測モデルにおける重回帰式〔式(II)〕の重相関係数と誤差分散

石 炭							
	北 米	中 南 米	ア ジ ア オ セ ニ ア	西 ア ジ ア	ア フ リ カ	西 欧	旧 共 産 圏
重相関係数	0.4859	0.7944	0.2472	0.7876	0.8318	0.8313	0.8407
誤 差 分 散	0.0067	0.0029	0.0041	0.0117	0.0014	0.0012	0.0006

石 油							
	北 米	中 南 米	ア ジ ア オ セ ニ ア	西 ア ジ ア	ア フ リ カ	西 欧	旧 共 産 圏
重相関係数	0.6753	0.8752	0.9106	0.5905	0.8655	0.8506	0.9301
誤 差 分 散	0.002	0.0003	0.1114	0.0135	0.0022	0.0022	0.0004

天 然 ガ ス							
	北 米	中 南 米	ア ジ ア オ セ ニ ア	西 ア ジ ア	ア フ リ カ	西 欧	旧 共 産 圏
重相関係数	0.9384	0.8227	0.8247	0.7733	0.6678	0.7057	0.9287
誤 差 分 散	0.0004	0.002	0.0023	0.0097	0.0345	0.0008	0.0001

図3(1) 石炭の消費量の実測値と予測値の比較
(——:実測値,:予測値)図3(3) 天然ガスの消費量の実測値と予測値の比較
(——:実測値,:予測値)図3(2) 石油の消費量の実測値と予測値の比較
(——:実測値,:予測値)

認するために、1976年の消費量の実測値を初期値として1984年までのエネルギー資源消費量の予測値を求め、求めた予測値と実測値を比較した。この結果を図3に示す。

図3を見ると、石炭、石油、天然ガスのいずれについても1979年およびその翌年の1980年において、消費量の実測値と予測値の差が大きくなっている。これは定数A、B、C、Dを決定した際に生じた誤差が、消費量の予測にも現れているためと考えられる。また石油については、全体的に予測値と実測値に差が大きい。これは西アジア地域の影響が大きいと推測される。しかし

石油価格の安定した1981年以降その消費量も安定し、二つのグラフは類似の傾きをもっている。また石炭と天然ガスについても実測値と予測値のグラフはよく似ているため、ここで作成したモデルにより将来の消費量を予測することはある程度可能であろうといえる。

4. シナリオの設定

需要量の変化に影響を与える各要因(価格、GDP、人口およびエネルギー利用効率)について、いくつかの場合を想定してシナリオを作成する。

モデルを実行する際には、ここで作成したシナリオを使用した。

(1) エネルギー資源価格についてのシナリオ

考えられるシナリオは、エネルギー資源価格が現在の上昇率と同じ程度の割合で上昇する場合、課税など種々の要因で現在よりも急激な価格上昇が起こる場合、また、反対に価格の上昇が緩やかになる場合である。そこでエネルギー資

源ごとにシナリオ Ac 1～Ag 3 を次のように設定する。

Ac 1、Ap 1、Ag 1：エネルギー資源価格の上昇率が現在と同じ程度

Ac 2、Cp 2、Ag 2：エネルギー資源価格の上昇率が大い

Ac 3、Ap 3、Ag 3：エネルギー資源価格の上昇率が緩やか

(c：石炭 p：石油 g：天然ガス)

(2) 国内総生産についてのシナリオ

国内総生産については、その成長率が現在と同じ程度の場合、発展途上国の多い地域で第二次産業の伸びが大きく成長が著しい場合が考えられる。そこでシナリオ B 1、B 2 を次のように設定する。

B 1：国内総生産の成長率が現在と同じ程度

B 2：国内総生産の成長率が大い

(3) 人口についてのシナリオ

表4 各要因のシナリオによる数値(設定値)

	北 米	中 南 米	ア ジ ア オ セ ニ ア	西 ア ジ ア	ア フ リ カ	西 欧	旧 共 産 圏
Ac 1	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Ac 2	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Ac 3	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Ap 1	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Ap 2	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
Ap 3	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Ag 1	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Ag 2	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
Ag 3	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
B 1	1.030	1.025	1.007	1.015	1.020	1.020	1.050
B 2	1.035	1.030	1.010	1.020	1.025	1.025	1.055
C 1	1.010	1.020	1.020	1.020	1.025	1.004	1.010
C 2	1.008	1.018	1.018	1.018	1.023	1.001	1.008
D 1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D 2	1.010	1.005	1.010	1.005	1.005	1.010	1.010
D 3	1.015	1.010	1.015	1.010	1.010	1.015	1.015

人口については、その伸び率が現在と同じ程度の場合、伸び率が緩やかになる場合が考えられる。そこでシナリオ C 1、C 2 を次のように設定する。

C 1：人口の伸びが現在と同じ程度

C 2：人口の伸びが緩やか

(4) エネルギー利用効率についてのシナリオ

エネルギー利用効率については、改善の度合いによってシナリオ D 1、D 2、D 3 を設定する。

D 1：エネルギー利用効率の改善が行われない場合

D 2：エネルギー利用効率の改善が緩やかに行われる場合

D 3：エネルギー利用効率の改善が急速に行われる場合

ここで考えたシナリオについて、それぞれの具体的な数値を表 4 に示す。

5. 予測結果

第 4 節で考えたシナリオとそのときの係数の設定値を用いて、数通りの組合せについて、1985 年を初期値として、西暦 2000 年までの毎年の CO₂ 排出量を計算した。

価格、人口、国内総生産およびエネルギー利用効率がほぼ現状のまま推移した場合、1986 年に約 5300Mt-C（炭素換算・メガトン）であった CO₂ 排出量が 2000 年には約 7400Mt-C になることがわかる。そして、この間のエネルギー消費量の変化は 6.3×10^{16} kcal から 9.2×10^{16} kcal になる。この値を他の研究者による予測結果と比較すれば、IPCC の予測¹⁴⁾ では 7300Mt-C (2000 年)、榎屋の基準ケースでのシミュレーションでは 6600Mt-C (2000 年) などとなっており、ほぼ同程度の予測結果であることがわかる。

エネルギー利用効率の改善の度合いと二酸化炭素排出量の関係を現したグラフ (図 4 (1)) からは、当然のことながら利用効率の急速な改善が行われた場合に最も二酸化炭素排出量が低減されることがわかる。

人口の上昇率の変化と二酸化炭素排出量の関係を示したグラフ (図 4 (2)) からは、その上昇率が緩やかになると二酸化炭素排出量が低減されることがわかる。

国内総生産の上昇率の変化と二酸化炭素排出量の関係を示したグラフ (図 4 (3)) からは、その上昇率が大きいと二酸化炭素排出量が増加することがわかる。

石油価格が上昇した場合 (図 4 (4)) には、現状の上昇率の場合に比べて石油の消費量が抑えられ、天然ガスの消費量が増加する。天然ガスの単位熱量あたりの二酸化炭素排出量は、石油のそれに比べて少ないため全体として二酸化炭素排出量が低減される。しかし、ここで設定した価格変動のシナリオの範囲内では、この効果はあまり大きくないように思われる。

天然ガスの価格の上昇が現状よりも大きくなる場合 (図 4 (5)) には、天然ガスの消費量が減少し、石油と石炭の消費量が増加し、二酸化炭素排出量が増加する。

石油価格が上昇し、天然ガスの価格の上昇率が緩やかな場合 (図 4 (6)) は、確かに石油の消費量が若干減少し、天然ガスの消費量がわずかに増加するが、一次エネルギー全体の消費熱量の変化は小さいため、二酸化炭素排出量の低減にはあまり効果がないと思われる。

以上のことを総合すると、二酸化炭素排出量の低減に最も効果的なシナリオは、エネルギー利用効率の急速な改善が行われ、人口の上昇率が緩やかになり、国内総生産の上昇率が小さくなり、石油価格が上昇するものである。しかし実際には、人口の上昇率や国内総生産の上昇率を人為的に操作することは困難であり、現在、二酸化炭素排出量の低減のために私達の取り得る対策としては、エネルギー利用効率の改善および石油消費に対しての課税などが挙げられると思われる。このときの予測結果を図 5 に示す。

6. 結 論

本研究では、新たに作成した二酸化炭素排出量予測のための簡略モデルによる将来予測を行

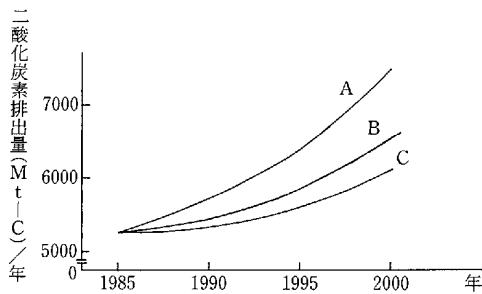


図4 (1) エネルギー利用効率の改善の度合いと二酸化炭素排出量
A：改善が行われない
B：緩やかな改善
C：急速な改善

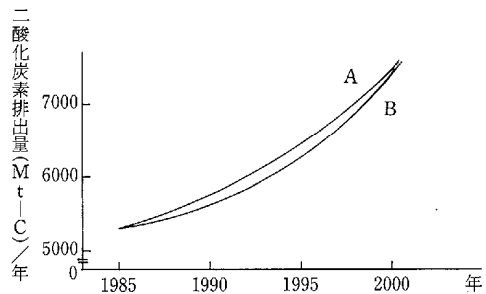


図4 (4) エネルギー資源価格の変化と二酸化炭素排出量(1)
A：現状の上昇率
B：石油価格の上昇

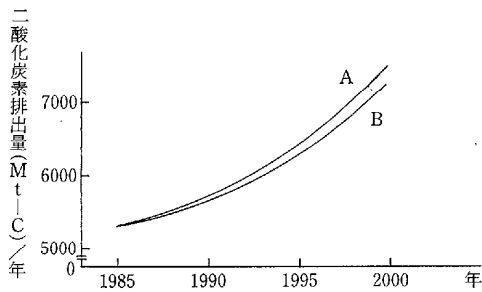


図4 (2) 人口の上昇率の変化と二酸化炭素排出量
A：現状の上昇率
B：現状よりも緩やかな上昇率

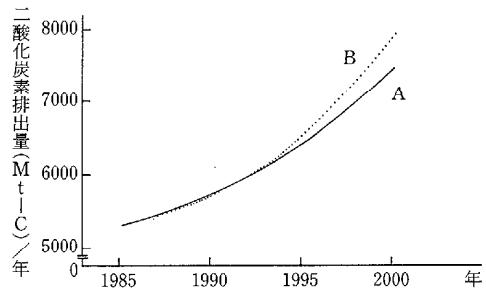


図4 (5) エネルギー資源価格の変化と二酸化炭素排出量(2)
A：現状の上昇率
B：天然ガス価格の上昇

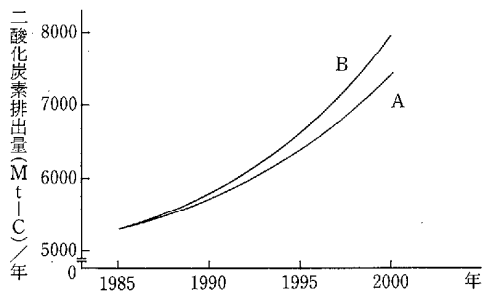


図4 (3) 国内総生産の上昇率の変化と二酸化炭素排出量
A：現状の上昇率
B：現状よりも大きな上昇率

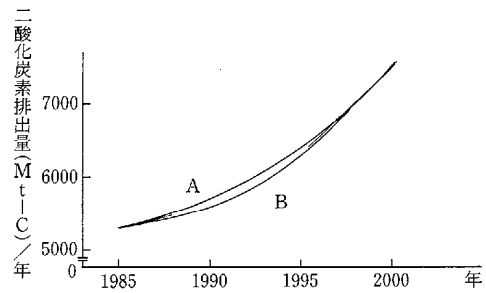


図4 (6) エネルギー資源価格の変化と二酸化炭素排出量(3)
A：現状の上昇率
B：石油価格の上昇、天然ガスについては価格の上昇を抑制

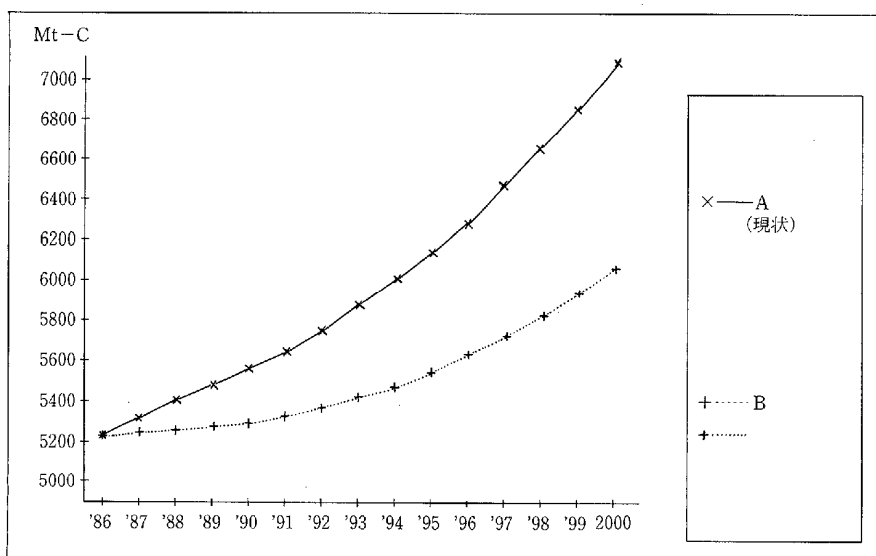


図5 現状のまま推移した場合(A)と最も二酸化炭素排出量の削減が大きいシナリオ(B)についての2000年までの二酸化炭素排出量予測値。

った。二酸化炭素の発生源として化石燃料の中から石炭、石油、天然ガスを取り上げ、世界を七つに分割した地域ごとにこれら3資源の需要量、供給量を予測するモデルを作成した。そして需要量と供給量の予測値から消費量の予測値を求めた。

需要量予測モデルでは、影響を与えると考えられる要因として価格、人口、国内総生産およびエネルギー利用効率を取り上げ、これらを入力条件として需要量の予測値を求める。1976年のデータを基にして需要量予測モデルを用いることにより、1985年までの需要量の予測値を求め、その値と供給量の予測値から消費量の予測値を導きだし、実際の値と比較検討を行うことによりモデルの信頼性を確かめた。この結果、オイルショックによる影響を受けていると考えられる1979年の値を除いては、実際の値と予測値がほぼ類似の傾向を示した。このことから、このモデルを用いて超長期ではない将来の予測を行うことは可能であろうと思われる。

以上のようにして求めた各資源ごとのエネルギー

資源消費量からその時の二酸化炭素排出量を計算した。したがって、作成したモデルの入力条件を変化させることにより、種々の設定条件における二酸化炭素排出量を予測した。

入力条件の中で人口、国内総生産およびエネルギー利用効率については、その上昇率の変化をシナリオで設定した。また価格についても、各資源ごとにシナリオを作成し、天然ガスの単位熱量あたりの二酸化炭素排出量が少ないことに着目して設定条件の選択を行った。

いくつかの設定条件における二酸化炭素排出量を求めた結果、各要因が以下の設定条件にあるとき、二酸化炭素排出量の予測値が最も小さくなった。1)エネルギー利用効率の改善が急速に行われる、2)人口の上昇率が緩やかになる、3)国内総生産の上昇率が小さくなる、4)石油価格の上昇が大きい。しかし、2)、3)の条件については、人為的に操作することは非常に困難であるために、現在、二酸化炭素排出量の低減のために私達の取り得る対策としては、1)、4)の設定条件の実行が最も効果的であると考えられる。

このモデルは、過去10年程度のデータを基にして作成したものであるため、長期にわたる予測を行うと信頼性が低下する可能性がある。また各要因の上昇率を入力条件として、一年ごとの予測を行うモデルであるために、予測をする年までの間にオイルショックや戦争などの突発的な事件が発生した場合には、このモデルによる予測値と実際の将来の値との間に大きな差が生じる危険がある。しかし、このモデルを用いて、近い将来における二酸化炭素排出量の動向を把握することは、ある程度可能であるといえる。

今後は、1) エネルギー経済についての既存モデルの考え方を取り入れること、2) 供給量の予測において埋蔵量による制約について考慮すること、3) 一次エネルギー全体に占める非化石燃

料の割合の変化をモデルに取り入れること、などを考慮する必要があると思われる。

現状においては、世界的にも二酸化炭素などの温室効果ガスの増大による地球温暖化への対応策が明確にされていない。したがって、このようなモデルを用いて得られる結果を評価することにより、二酸化炭素排出量の低減に効果的な対応策について理解することが可能になるものと期待される。

謝 辞

本研究の実施に際しては、芝浦工業大学・工業経営学科の若尾順さん、錦織誠一君、東京情報大学・経営学科の染谷康一君、水谷卓郎君の協力をいただいた。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 熊倉修、世界エネルギー需要モデル、電力中央研究所報告、585006 (1985)。
- 2) 佐和隆光、中島清三、大山達雄、森俊介、和合肇、片岡正憲、D.J.Poirier、エネルギー需要の計量分析、経済企画庁経済研究所研究シリーズ第40号、(1983)。
- 3) P.Basile、Global Energy Modelling And Implementation For Planning, NATO Adv. Study Inst. Ser. E, No.37 (1981), 9-33.
- 4) 早野拓朗、榎屋治紀、新エネルギーコストのモデル化とシミュレーション、エネルギー・資源、Vol.11, No. 2 (1991), 46-53。
- 5) R.Wilson、Global Energy Use: A Quantitative Analysis, Conf. on Global Climate Change Linkages, 121-163 (1989)。
- 6) J.Edmonds and J.Reilly、Long-Term Global Energy-Economic Model of Carbon dioxide Release from Fossil Fuel Use, Energy Economics, Vol.5 No.2 (1983), 74-88.
- 7) 林正康、中山哲男、産業活動起源の二酸化炭素の放出予測、公害、Vol.27 No.1 (1992), 83-89。
- 8) 清水定明、加藤和彦、小山茂夫、伊原征治郎、長期世界エネルギー・CO₂モデルによる炭酸ガス排出量の予測、平成三年電気学会全国大会、13.88-13.89, (1991)。
- 9) 榎屋治紀、シミュレーションによる地球温暖化対策評価の試み、環境研究1990、No.77 (1990), 118-139。
- 10) B.Keepin、Review of Global Energy And Carbon Dioxide Projections, Annual Rev. Energy, Vol.11 (1986), 357-392。
- 11) 国際連合、エネルギー統計年鑑、1980、1985年度版。
- 12) 国勢社、世界国勢図会、1985年度版。
- 13) 国際連合、世界統計年鑑、1985、1986年度版。
- 14) 霞が関地球温暖化問題研究会、IPCC 地球温暖化レポート、中央法規出版(株)(1991)。